第 37 卷第 11 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37, No.11
Jun., 2017

DOI: 10.5846/stxb201604130673

丁程锋,张绘芳,李霞,李伟涛,高亚琪.天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例.生态学报,2017,37(11):3733-3743.
Ding C F, Zhang H F, Li X, Li W T, Gao Y Q.Quantitative assessment of water conservation function of the natural spruce forest in the central Tianshan Mountains: a case study of the Urumqi River Basin.Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3733-3743.

天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估
——以乌鲁木齐河流域为例

丁程锋[1,2],张绘芳[1],李　霞[2],李伟涛[3],高亚琪[1,*]

1 新疆林业科学院现代林业研究所,乌鲁木齐　830000
2 新疆农业大学草业与环境科学学院,乌鲁木齐　830052
3 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州　239000

摘要:为定量分析天山中部流域尺度云杉天然林水源涵养功能,以乌鲁木齐河流域为研究区,使用 InVEST 模型,研究云杉林及其它主要地类水源涵养量的大小,并对云杉林在不同分布面积、不同地形因子条件下的水源涵养量变化进行定量分析。结果表明:①InVEST 模型可较好的确定研究区流域尺度水源涵养量。基于 InVEST 模型的模拟,乌鲁木齐河流域云杉林区水源涵养总量为 4.93×10^6 m^3,占研究区水源涵养总量(2.41×10^7 m^3)的 20.46%,林区平均水源涵养深度为 54.25 mm;②云杉林区水源涵养量的大小在海拔、坡度、坡向上的变化与云杉林空间分布格局一致,每公顷水源涵养量随海拔升高先增大后降低、随坡度增大而降低;阴坡水源涵养能力最强;③研究区各地类中以林地水源涵养量最大(水源涵养量 544.78 m^3/hm^2),随着云杉林覆盖率的不断增加,水源涵养总量、平均水源涵养深度及单位面积涵养量均呈增加趋势;④研究区水源涵养量的贡献率与森林面积密切相关,云杉林面积每增加 1%,研究区与云杉林区水源涵养总量分别增加 0.437×10^6 m^3、0.522×10^6 m^3;加强对研究区云杉林的保护与抚育管理,才能使森林发挥持续稳定的水源涵养生态服务功能。

关键词:水源涵养功能;InVEST 模型;云杉林;天山中部;乌鲁木齐河流域

Quantitative assessment of water conservation function of the natural spruce forest in the central Tianshan Mountains: a case study of the Urumqi River Basin

DING Chengfeng[1,2], ZHANG Huifang[1], LI Xia[2], LI Weitao[3], GAO Yaqi[1,*]

1 *Institute of Modern Forestry, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi* 830000, *China*
2 *College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
3 *School of Geography Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou* 239000, *China*

Abstract: To quantitatively investigate the water conservation function of the natural spruce forest at the watershed scale in the central Tianshan Mountains, the Urumqi River Basin was chosen as a study area. The InVEST model was used to investigate the capacity for water conservation of the spruce forest and other land use types, as well as quantitatively analyze water conservation changes of the spruce forest under the conditions of different distribution areas and terrain factors. The results showed that: (1) The InVEST model could adequately assess water conservation at the watershed scale. The InVEST model simulation showed that the total water conservation of the spruce forest in the Urumqi River Basin was 4.93×10^6 m^3, which accounted for 20.46% of the total water conservation in the study area (2.41×10^7 m^3). In addition, the average water conservation depth of forest area was 54.25 mm. (2) The contribution rate of water conservation in the slope, aspect, and elevation was consistent with the spatial distribution pattern of the spruce forest. At first, per hectare water conservation

基金项目:新疆公益性科研院所基本科研业务经费资助项目(XMBM000001953);安徽省滁州学院培育项目(2014PY02)
收稿日期:2016-04-13;　　**网络出版日期:**2017-02-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gyq611003@163.com

increased with altitude and then decreased, and it decreased with an increase in slope. The water conservation ability in the shade slope was greatest. (3) The spruce forest showed the greatest capacity, which reached 544.78 m^3/hm^2. The total, average depth and unit area of water conservation exhibited an increasing trend with increasing spruce forest coverage. (4) The contribution rate of water conservation in the spruce forest was closely related to forest area. Total water conservation in study area and spruce area increased to 0.437×10^6 m^3 and 0.522×10^6 m^3 with a 1% increase of spruce forest area, respectively. Therefore, the forest plays a vital role in maintaining sustainable and stable water conservation and ecological service functions, which necessitate effective measures to strengthen the protection and management of spruce forests.

Key Words: water conservation function; InVEST model; the spruce forest; the Central Tianshan Mountains; Urumqi River Basin

水源涵养是森林的重要生态功能,以往对森林水源涵养功能的研究大多基于林分尺度或坡面尺度[1],量化流域尺度森林水源涵养功能,是水资源管理的需求也是多年来森林水源涵养功能研究的瓶颈。为正确认识森林的水源涵养功能,众多学者通过固定样地调查、长期野外监测方式,采用水量平衡法[2]、蓄水能力法[3]、综合评价法[4]、林冠截留法[5]等对林分尺度、坡面尺度下的云杉林水源涵养功能进行研究,但对流域尺度云杉林水源涵养功能的定量评估却鲜见报道。位于乌鲁木齐河流域中山带的云杉天然林,担负着涵养水源、调蓄山区降水、保护冰川安全和维护区域生态平衡的重大生态责任[6]。定量分析天山中部流域尺度云杉林变化条件下的水源涵养功能,对推进干旱区森林生态功能的定量评估及水资源的科学管理都具有重要意义。

随着 GIS 技术与生态系统服务模型的发展,流域尺度水源涵养功能定量评估已成为可能[7]。InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型是生态系统服务模型中应用最成熟的模型之一,该模型不仅可将评价结果以地图的形式直观表达出来,并可以进行多尺度、多情景的分析[8]。目前已被广泛应用于不同区域生态系统服务功能[9-11]、水质净化[12]、土壤侵蚀与保持[13]、生境质量评价[14]等方面的研究。

自 2010 年起,InVEST 模型逐渐被应用于森林水源涵养评价,傅斌等[15]利用 InVEST 模型中的水源涵养模型对四川都江堰市水源涵养功能进行了分析,并采用综合指数法对研究区水源涵养的重要性进行了评价;余新晓等[16]以北京山区为研究区,在森林资源二类调查数据基础上,对森林景观类型进行了划分,并利用 InVEST 模型对不同森林景观类型的水源涵养功能进行了评价;王纪伟等[17]以汉江上游为研究区,利用 InVEST 模型对该区域各森林生态系统的水源涵养量进行了计算,并分析了该区域水源涵养功能的空间变化趋势;白杨等[7]以白洋淀流域为研究区,通过建立森林变化情景,利用 InVEST 模型对不同情景下的水源涵养功能进行了评价;李明阳等[18]基于实测数据和遥感数据,利用 InVEST 模型,对武夷山国家自然保护区内森林土壤涵养水源的能力进行了分析。上述研究为使用 InVEST 模型进行新疆天山中部云杉天然林森林水源涵养功能定量评估提供了思路。本文在确定研究区云杉林分布范围变化规律的基础上,基于流域多年平均降水与蒸散发数据,利用 InVEST 模型,综合考虑气候、土壤、地形等因素,定量评估流域尺度云杉林的水源涵养功能,为水资源有效利用及更大尺度水源涵养功能预测与评估提供依据。

1 研究区概况

研究区位于天山中部 86°45′—87°56′ E,43°00′—44°07′ N 间的乌鲁木齐河流域(图 1)。山区(西白杨沟口以上)流域集水面积 1070 km^2,其中冰川面积约 38 km^2,流域山体高大,地形陡峻,平均海拔 3006 m,平均坡度 48.5°,年径流量 2.37 亿 m^3。流域南起乌鲁木齐河上游天山山脉的依连哈比尕山分水岭,北至古尔班通古特沙漠南缘的东道海子,西接头屯河流域,东到乌拉泊和柴窝堡洼地之间的分水岭,由南至北各支流泉沟汇入东道海子[19]。流域属典型大陆性气候,多年平均气温 2.1 ℃,多年平均降水 449.2 mm,降水年内分配不均,主要集中在夏季,5—9 月占全年降水量比重最大,约为 70%。植被分布以中山带雪岭云杉(*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.)为主,研究区内云杉林面积约 90.85 km^2(图 2)。流域内土壤垂直地带变化明显,依次为高山草

甸土、灰褐色森林土、黑钙土、山地栗钙土。

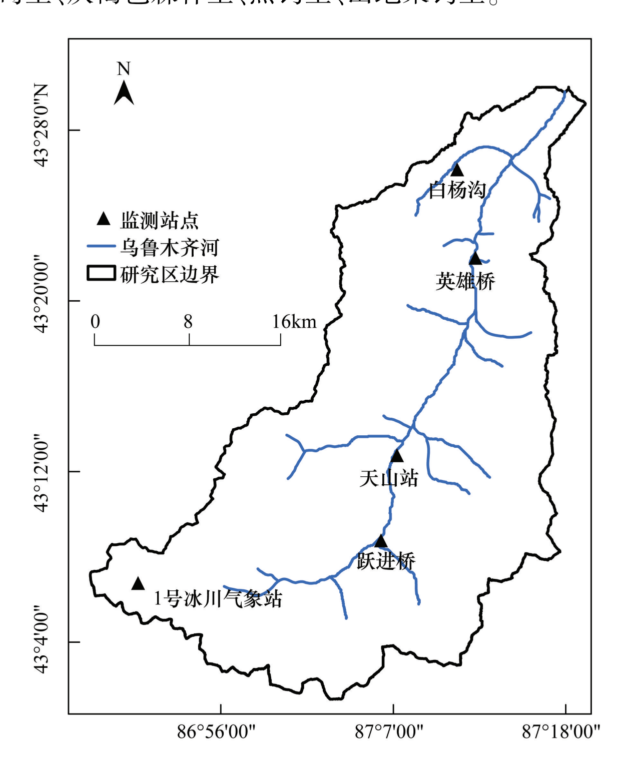


图 1　研究区示意图

Fig.1　The location of the study area

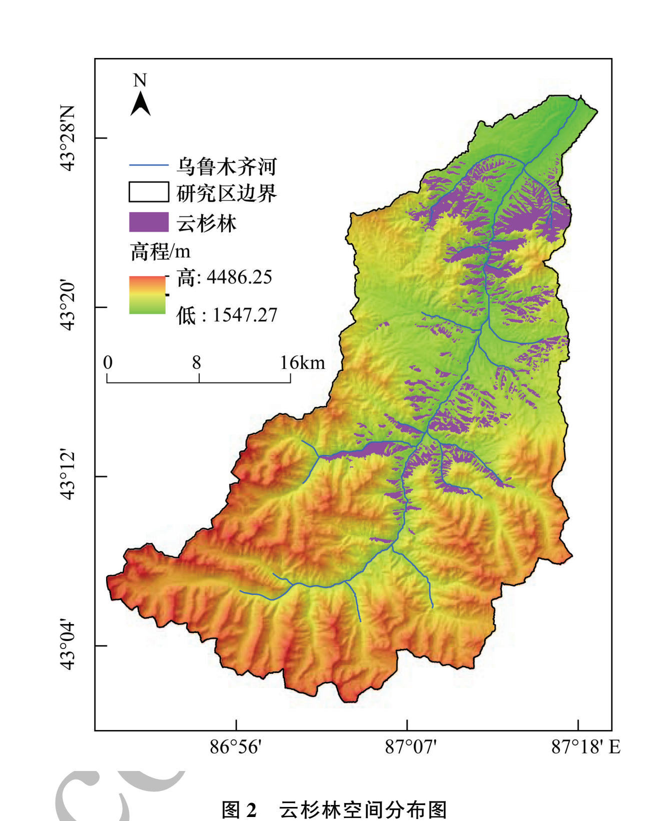


图 2　云杉林空间分布图

Fig.2　The spatial distribution map of spruce forest

2　数据与方法

2.1　数据来源与处理

本研究所需主要数据有:多年平均降水量、多年潜在蒸散发、土壤深度、土壤可利用有效水、土壤饱和导水率、土地利用类型图、流域及子流域边界等,研究所需其数据来源及处理方法见表 1。

表 1　数据来源及处理方法

Table 1　Data sources and processing methods

数据类型 Data types	数据来源及处理 Data sources and processing
多年平均降水量 Average annual precipitation	1980—2013 年研究区英雄桥、白杨沟两个站点气象数据,1 号冰川、天山站多年平均降水数据(各站点位置见图 1)及研究区多年平均等降水量线数据[20-22],利用 ArcGIS 空间分析工具进行拓扑插值
多年潜在蒸散发 Many potential evapotranspiration	由 SWAT 模型模拟,经 ArcGIS 空间插值
土壤深度 Soil depth	根据土壤类型分布图(国际和谐土壤数据库),从《新疆土壤》[23]和《新疆土种志》[24]查询
土壤可利用有效水 Soil available water 土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity	利用 SPAW(Soil Plant Atmosphere Water)软件模拟,经 ArcGIS 栅格化而来
土地利用类型图 Land use types	利用 ENVI5.0 软件,对 2013 年 8 月 28 日云量为 0.93%的 Landsat ETM+ 15m 分辨数字影像进行地类解译,精度 93%,Kappa 系数 0.91,满足模型精度要求[25]
流域及子流域边界 Basin and sub basin boundary	利用 ArcGIS 软件,对研究区等高距 10 m 的地形数据进行空间插值,模拟生成输出像元大小为 10 m、投影坐标为西安 1980、中央经线 87°E 的数字高程模型(DEM),由水文分析提取而来

2.2 方法

2.2.1 产水量模拟

InVEST 模型的产水量模块是基于水量平衡法开发而来,将每个栅格上的降水量减去实际蒸散发后的水量,以栅格为单元定量评价不同地块的产水能力[16]。计算公式如下:

$$Y_{xj} = (1 - AET_{xj}/P_x) \times P_x \tag{1}$$

式中,Y_{xj}为森林类型j中单元格x上的年产水量(mm);AET_{xj}为森林类型j中单元格x上的年实际蒸散量(mm);P_x为单元格x上的年降水量(mm)。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega x R_{xj}}{1 + \omega x R_{xj} + 1/R_{xj}} \tag{2}$$

式中,R_{xj}为土地利用类型j上栅格单元x的干燥指数,无量纲,表示潜在蒸发量与降雨量的比值。

$$R_{xj} = \frac{k \times ET_0}{Px} \tag{3}$$

式中,k为作物系数,即蒸散系数,是作物蒸散量与潜在蒸散量的比值;ET_0为潜在蒸散发量。

ωx 为修正植被年可利用水量与降水量的比值,无量纲:

$$\omega x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} \tag{4}$$

式中,Z为 zhang 系数,是表征多年平均降水特征用的一个常数,是模型的关键参数,默认值是 9.433;AWC_x为可利用水。

2.2.2 水源涵养计算

用 InVEST 模型中的产水量模块计算年产水量之后,根据 DEM 计算地形指数D,考虑不同土壤的渗透性、不同土地利用类型地表径流流速系数的影响,最后计算水源涵养量[16],计算公式如下:

$$WR = \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.9\times D/3) \times \min(1, K_{soil}/300) \times Y \tag{5}$$

式中,WR为多年平均水源涵养量(mm);D为地形指数,无量纲;K_{soil}为土壤饱和导水率(cm/d);V为流速系数,由相关文献获得[15];Y为产水量。

$$D = \log\left(\frac{\text{Watershed pixel count}}{\text{Soil depth} \times \text{Percent slope}}\right) \tag{6}$$

式中,Watershed pixel count 为集水区栅格数量,无量纲;Soil depth 为土壤深度(mm);Percent slope 为百分比坡度。

2.2.3 地形因子区间划分

为定量评估云杉林区水源涵养与地形因子关系,对海拔、坡向和坡度进行区间划分,并利用 ArcGIS 空间统计工具统计各区间范围的水源涵养量。其中,海拔划分以 1600 m 为起始基准,每增加 200 m 为 1 级,共划分为 7 级:1600—1800、1800—2000、2000—2200、2200—2400、2400—2600、2600—2800、2800—3000 m;坡向以正北方向为 0°,按 45°角,顺时针旋转划分 6 个方向:阴坡(0°—45°,315°—360°)、东北坡(45°—90°)、东南坡(90°—135°)、阳坡(135°—225°)、西南坡(225°—270°)、西北坡(270°—315°);坡度划分为 6 个等级:平坡(<5°)、缓坡(5°—15°)、斜坡(15°—25°)、陡坡(25°—35°)、急坡(35°—45°)、险坡(>45°)。

2.2.4 情景模拟

研究区云杉林以中龄林为主,幼龄林分布较少[26],在高海拔地带,由于气候条件等多方面的原因,云杉林分布稀疏,生长不良;在低海拔地带,因降水较少,气温较高,云杉林生长也不好,唯中海拔地带降水充沛,气候温和,适宜云杉林生长[27]。为研究云杉林分布变化对水源涵养的影响,根据张毓涛、刘贵峰等[26,28]研究成果(云杉林主要分布在海拔 1800—2700 m、坡度 10°—50°的阴坡半阴坡区域)和天山云杉的生物学特征[27]设定云杉林变化的 5 种情景,分别利用 InVEST 模型对不同情景下的产水量进行模拟,根据 2.2.2 的方法计算各情

景下的水源涵养量(各情景模拟过程中,其它数据不变,只改变土地利用类型数据),最后运用线性趋势分析法分析不同情景间的水源涵养量差异。设定的云杉分布 5 种情景如下(图 3 为云杉林现状分布(情景 1)、云杉林覆盖最大(情景 3)、无云杉林(情景 5)的情景图):

情景 1　现有云杉林实际分布,此时,云杉林覆盖率为 8.17%;

情景 2　海拔 1800—2700 m、坡度 10°—50°区域内阴坡全部纳为林地,此时,云杉林覆盖率 12.26%;

情景 3　海拔 1800—2700 m、坡度 10°—50°区域内的阴坡、半阴坡全部纳为林地,此时,云杉林覆盖率 17.73%;

情景 4　现有半阴坡区域的林地转换为草地,此时,云杉林覆盖率 5.73%;

情景 5　现有云杉林全部转换为草地,此时,云杉林覆盖率 0%。

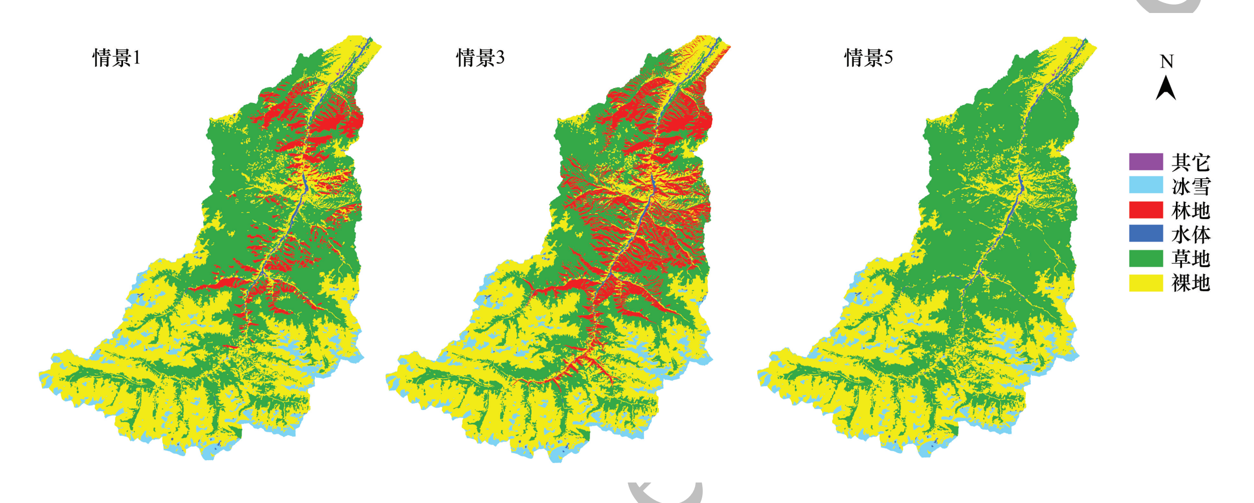


图 3　不同情景土地利用类型图

Fig.3　The land use map of different situations

3　结果与分析

3.1　研究区水源涵养量总体分析

3.1.1　水源涵养量空间分布规律

根据 2.2.1 的方法,得到研究区产水量,在此基础之上,根据 2.2.2 的方法计算得到研究区水源涵养量空间分布图(图 4)。由图 4 得出,研究区多年平均水源涵养深度在 0—118.54 mm 之间,水源涵养总量为 2.41×10^7 m^3。

水源涵养功能总体呈西高东低、北高南低的趋势,水源涵养量较高的区域主要有两个:①云杉林分布区,由于森林覆盖,林下土壤层较厚,有利于土壤孔隙度发育,且土壤表层枯落物较多,形成良好的土壤结构及通风状况,其土壤下渗、持水能力较强[15,17],有利于对水分的截留;②研究区中西部区域,因该区多年平均降水量较大、且草地广泛分布所致。

水源涵养功能较差的区域主要有:①研究区南部高海拔区,该区为裸岩和永久冰川,几乎无土壤、植被分布,降水截留能力较差;但该区域有少量水源涵养功能较高的地方,叠加土地利用类型图可知,散布水源涵养较高的地方属于草地分布区;②流域北部出山口,该区是人类活动集中区,建设用地和耕地的水源涵养能力较差[15],区域降水少、蒸发量大,故水源涵养量较低。

3.1.2　不同土地利用类型的水源涵养量分析

利用 ArcGIS 空间统计分析工具,统计不同土地利用类型每公顷水源涵养量,得到表 2。由表 2 可知,不同土地利用类型水源涵养总量依次为:草地(1394.43×10^4 m^3)>裸地(508.08×10^4 m^3)>林地(494.72×10^4 m^3)>冰雪(35.47×10^4 m^3)>水体(1.98×10^4 m^3)>其它(0.39×10^4 m^3),分别占研究区水源涵养总量的 57.26%、

20.86%、20.32%、1.46%、0.08%、0.02%，水源涵养总量的大小与各种地类面积有很大关系[29]，但不同土地类型的水源涵养总量的大小与其水源涵养能力的大小并无紧密关系[30]。

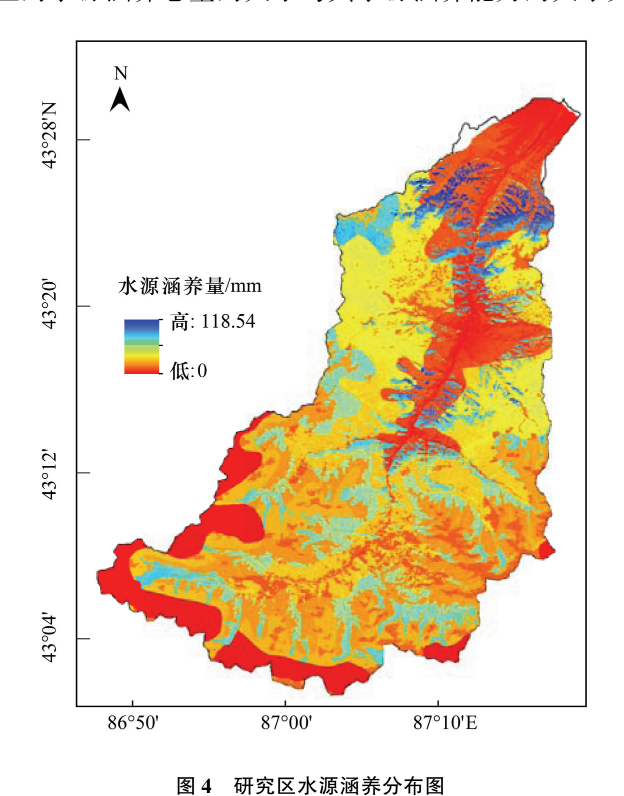


图 4 研究区水源涵养分布图

Fig.4 Water conservation in the study area

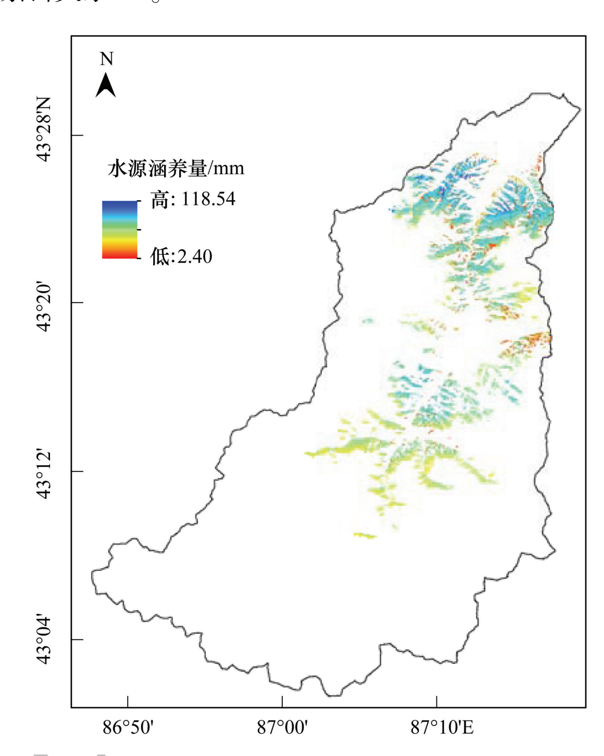


图 5 云杉林区水源涵养分布图

Fig.5 Water conservation in forest region

不同土地利用类型的水源涵养能力大小由每公顷水源涵养量来衡量，由表 2 知，各土地利用类型每公顷水源涵养量大小顺序为：林地(544.78 m^3/hm^2)>草地(275.29 m^3/hm^2)>裸地(118.85 m^3/hm^2)>其它(88.23 m^3/hm^2)>冰雪(50.68 m^3/hm^2)>水体(23.41 m^3/hm^2)，林地水源涵养能力最强，这主要是由于林地土壤孔隙度较大，且对土壤结构改善作用明显。

表 2 不同土地利用类型水源涵养量

Table 2 Water conservation of different land use types

指标 Indexes	林地 Forest	草地 Grassland	裸地 Bare	其它 Others	冰雪 Ice-snow	水体 Water
面积 Area/km^2	90.85	511.81	428.36	0.44	71.66	8.49
水源涵养总量 Total/$\times10^4$ m^3	494.72	1394.43	508.08	0.39	35.47	1.98
每公顷涵养量 Per hectare/(m^3/hm^2)	544.78	275.29	118.85	88.23	50.68	23.41

3.2 云杉林区水源涵养量分析

3.2.1 云杉林区水源涵养量分析

在确定研究区水源涵养空间分布图基础上，以云杉林林区为边界，裁剪得到林区水源涵养分布图(图 5)。由图 5 看出，云杉林林区多年平均水源涵养深度在 2.4—118.54 mm 之间；研究区林地覆盖率 8.17%，水源涵养总量为 4.93×10^6 m^3，占研究区水源涵养总量的 20.46%，林地平均水源涵养深度 54.25 mm，云杉林区水源涵养功能呈现出北高南低、西高东低的趋势。

3.2.2 云杉林区水源涵养与地形因子关系

在研究区，地形微环境影响水、土和热量的分布，由于水热环境的不同使森林分布格局、地表状况及土壤

状况发生变化[17]。根据 2.2.3 的方法统计不同地形因子不同区间范围内的水源涵养量,分别得到表 3—表 5。

表 3　不同海拔水源涵养量

Table 3　Water conservation function at different elevation

海拔等级 Elevation class/m	不同区间林地面积占林地总面积比 Forest area percent/%	水源涵养总量 Total/m^3	水源涵养贡献率 Contribution rate/%	每公顷涵养量 Per hectare/(m^3/hm^2)
1600—1800	0.08	24042.77	0.05	329.66
1800—2000	5.06	2506160.51	5.07	529.03
2000—2200	18.21	9985964.41	20.19	593.47
2200—2400	30.71	16120276.93	32.58	573.21
2400—2600	32.74	15388529.08	31.11	518.89
2600—2800	12.86	5343448.58	10.80	479.12
2800—3000	0.34	103584.79	0.21	368.08

表 4　不同坡度水源涵养量

Table 4　Water conservation function at different slope

坡度分类 Slope class/(°)	不同区间林地面积占林地总面积比 Area percent/%	水源涵养总量 Total/m^3	水源涵养贡献率 Contribution rate/%	每公顷涵养量 Per hectare/(m^3/hm^2)
平坡 Flat	0.47	277736.18	0.56	652.12
缓坡 Gentle	5.17	2996916.53	6.06	637.86
斜坡 Ramp	17.44	9376865.94	18.95	591.93
陡坡 Steep	34.98	17467287.91	35.31	549.62
急坡 Sharp	31.09	14675460.31	29.66	519.52
险坡 Perilous	10.85	4677740.18	9.46	474.61

表 5　不同坡向水源涵养量

Table 5　Water conservation function at different aspect

坡向分类 Aspect class/(°)	不同区间林地面积占林地总面积比 Area percent/%	水源涵养总量 Total/m^3	水源涵养贡献率 Contribution rate/%	每公顷涵养量 Per hectare/(m^3/hm^2)
阴坡 North	61.26	31264876.10	63.20	567.90
西北 Northwest	17.26	8407230.59	16.99	536.02
东北 Northeast	12.70	6081560.48	12.29	525.95
东南 Southeast	2.08	819941.47	1.66	431.57
西南 Southwest	5.12	2253018.67	4.55	447.44
阳坡 South	1.58	645379.76	1.30	399.94

由表 3 可知,不同海拔云杉林水源涵养量的贡献率分别为:0.05%、5.07%、20.19%、32.58%、31.11%、10.80%、0.21%,以海拔 2200—2400 m 处贡献率最大,这与云杉林在不同海拔区间分布的面积比有很大关系;就每公顷水源涵养量来说,以海拔 2000—2200 m 处每公顷水源涵养能力最强,达 593.47 m^3/hm^2,其次是 2200—2400 m,为 573.21 m^3/hm^2,海拔 1600—1800 m 与 2800—3000 m 处每公顷水源涵养能力较弱,分别为 329.66、368.08 m^3/hm^2,这与不同海拔降水及森林分布有关。

由表 4 可知,不同坡度(平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡、险坡)条件下,云杉林水源涵养量的贡献率分别为:0.56%、6.06%、18.95%、35.31%、29.66%、9.46%,这与云杉林在不同坡度分布的面积比有很大关系;就单位面积水源涵养量来说,平坡(652.12 m^3/hm^2)>缓坡(637.86 m^3/hm^2)>斜坡(591.93 m^3/hm^2)>陡坡(549.62 m^3/hm^2)>急坡(519.52 m^3/hm^2)>险坡(474.61 m^3/hm^2),在重力作用下,土壤水分沿坡向下运动并在平缓的地方聚集[31],因此,林区单位面积水源涵养能力随着坡度的增大而逐渐减弱。

由表 5 知,不同坡向(阴坡、西北、东北、东南、西南、阳坡)条件下,云杉林水源涵养量贡献率分别为:

63.20%、16.99%、12.29%、1.66%、4.55%、1.30%，这与云杉林在不同坡向分布面积比有很大关系。越接近阴坡，森林分布状况越好，降水较阳坡多，且每次降水后，阳坡蒸散发强烈，经一段时间后，阳坡土壤含水量较阴坡要小[32]，因此，阳坡水源涵养总量小于阴坡；就单位面积水源涵养量来说，越接近阴坡，其水源涵养能力越强，阴坡每公顷水源涵养量达 567.90 m^3/hm^2，阳坡为 399.94 m^3/hm^2，因阴坡有森林分布，土层厚度大，森林可有效增加土壤孔隙度、减小容重[33]，阳坡无森林分布，土壤较薄、土层紧实，蓄积水分的能力较阴坡弱，因此，单位面积水源涵养量较阴坡低。

3.3 不同云杉林面积设定情景下水源涵养特征分析

3.3.1 研究区水源涵养变化

根据 2.2.4 设定的不同情景，分别统计各情景下水源涵养总量及平均水源涵养深度，得到表 6。

表 6 不同情景的水源涵养量

Table 6 Water conservation of different scenarios

指标 Indexes	情景 Scene 1	情景 Scene 2	情景 Scene 3	情景 Scene 4	情景 Scene 5
平均涵养 Mean/mm	21.85	24.10	27.10	20.68	17.95
水源涵养总量 Total/$\times10^7$ m^3	2.41	2.66	2.99	2.28	1.98

由表 6 知，不同情景水源涵养量顺序为：情景 3>情景 2>情景 1>情景 4>情景 5，随着云杉林覆盖率的增大（0—197.06 km^2），研究区平均水源涵养深度由 17.95 mm 增加到 27.10 mm，水源涵养总量由 1.98×10^7 m^3增加到 2.99×10^7 m^3。随着研究区云杉林覆盖率增大，其水源涵养功能增大。

以情景 1 云杉林现实覆盖率及水源涵养量为基准，采用线性趋势分析法，分析不同情景与情景 1 的研究区水源涵养总量变化差异，得到图 6 及如下方程：

$$\Delta WR = 0.0437\Delta F - 0.0505 \qquad R^2 = 0.9951 \qquad P<0.01$$

式中，ΔF 为云杉林面积变化率；ΔWR 为研究区水源涵养总量变化。计算表明云杉林面积变化，对研究区水源涵养总量变化影响极显著，云杉林覆盖率每增加 1%，研究区水源涵养总量增加 0.437×10^6 m^3。

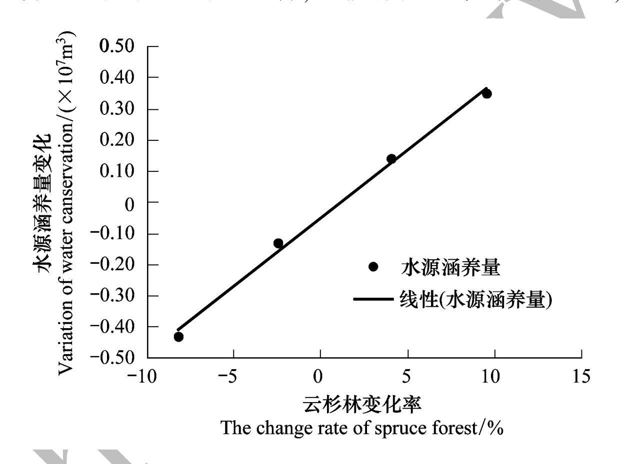


图 6 云杉林变化率与研究区水源涵养关系图

Fig.6 Relationship between the change rate of spruce forest and water conservation in the study area

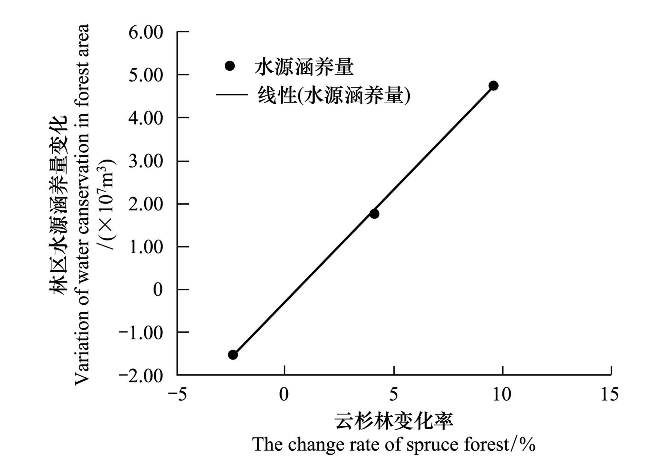


图 7 云杉林变化率与林区水源涵养关系图

Fig.7 Relationship between the change rate of spruce forest and water conservation in forest area

3.3.2 云杉林面积变化及其水源涵养量的响应特征

运用 ArcGIS 空间统计分析功能，统计不同情景下林区水源涵养量，见表 7。由表 7 知，不同情景林区水源涵养功能大小顺序为：情景 3>情景 2>情景 1>情景 4>情景 5；在未来林地面积增加的两种情景下（情景 2、情景 3），林区平均水源涵养深度从 54.25 mm 分别上升到 59.74、62.63 mm，林区水源涵养总量从 $4.93\times10^6m^3$分别上升到 8.13×10^6、$12.28\times10^6m^3$，其单位面积涵养量从 542.65 m^3/hm^2分别上升到 596.74、623.16 m^3/hm^2；当

未来林地面积减少(情景 4)直至消失(情景 5)时,林区平均水源涵养深度从 54.25 mm 下降到 53.59 mm,水源涵养总量减少了 $1.52×10^6$ m^3。

表 7　不同情景的林区水源涵养量

Table 7　Water conservation of forest region in different scenarios

指标 Indexes	情景 Scene 1	情景 Scene 2	情景 Scene 3	情景 Scene 4	情景 Scene 5
平均水源涵养深度 Mean/mm	54.25	59.74	62.63	53.59	—
水源涵养总量 Total/$×10^6$ m^3	4.93	8.13	12.28	3.41	—
林地面积 Forest area/km^2	90.85	136.24	197.06	63.73	—
每公顷水源涵养量 Per hectare/(m^3/hm^2)	542.65	596.74	623.16	535.10	—

—表示林地消失,不计算水源涵养量

以情景 1 云杉林现实覆盖率及水源涵养量为基准,采用线性趋势分析法,分析不同情景与情景 1 的林区水源涵养量变化差异,得到图 7 及如下方程:

$$\Delta WR_f = 0.5215\Delta F - 0.2852 \qquad R^2 = 0.9995 \qquad P < 0.05$$

式中,ΔF 为云杉林面积变化率;ΔWR_f 林区水源涵养量变化。计算表明云杉林面积变化,对林区水源涵养量有显著的影响,云杉林覆盖率每增加 1%,林区水源涵养量增加 $0.522×10^6$ m^3。

综上所述,随着云杉林面积的不断增加,林区水源涵养功能不断增强,平均水源涵养深度、水源涵养总量及单位面积涵养量均呈现增加趋势,云杉林具有显著的水源涵养能力。

4　讨论

(1)有关学者研究表明:常绿针叶林最大水源涵养深度为 321.94 mm,平均水源涵养深度为 83.29 mm[17],这与本文研究结果有一定差异,可能与森林类型、局地气候、局地土壤条件等因子不同有关。本文运用 InVEST 模型对流域尺度云杉天然林水源涵养功能进行了定量评估,云杉林区水源涵养功能呈现出北高南低、西高东低的趋势,这是否与云杉林的生长分布及其微环境有关? 还有待进一步研究。此外,由于森林水源涵养功能的复杂性,未来还需对以下问题进行研究:①如何充分利用现有林分尺度、坡面尺度的观测研究成果,实现森林水源涵养功能的尺度推移? ②在使用 InVEST 模型过程中,如何解决同一土壤类型的物理属性(土壤饱和导水率、可利用有效水)在空间分布上存在的差异? 怎样设计更大密度的野外观测及调查方案,才能有效模拟和弥补这一不足?

(2)纵观各学者研究成果,对不同土地利用类型的水源涵养能力观点基本一致,森林、草地等植被覆盖率较高的区域水源涵养能力较强,裸地、建设用地等硬质地面及植被稀疏区水源涵养能力较低[15,30],但流域水体水源涵养量最低,这与本研究结果一致。其原因是河道两侧的河床土壤粒径较大,河道水分消耗于垂直方向的渗透与水平方向的侧向流,水分易流失,且在冬季河道两侧水分向河道汇集,而在夏季则是河流水分向河道两侧流失,河流作为水分传输的载体,对水分的截留能力相对较弱。

(3)吴丹等[3]、刘璐璐等[29]、孙清琳等[34]分别对江西省、四川省、浙江省的森林水源涵养与地形因子的关系进行了研究,结果均表明水源涵养量的贡献率与森林面积分布有密切关系,每公顷水源涵养量随坡度增大而降低;这与本文研究结果一致。但对每公顷水源涵养量与海拔的关系却不尽相同,这可能是不同区域、不同海拔森林分布的状况不同所致。

5　结论

(1)InVEST 模型可较好的确定乌鲁木齐河流域的水源涵养量。InVEST 模型模拟表明,研究区水源涵养总量 $2.41×10^7$ m^3,其中,占研究区总面积 8.17%的云杉林区,水源涵养总量为 $4.93×10^6$ m^3,达研究区水源涵养总量的 20.46%,林区平均水源涵养深度为 54.25 mm。

(2)云杉林区水源涵养量的贡献率与森林面积分布密切相关,其水源涵养量贡献率在海拔、坡度、坡向上的分布与云杉林空间分布格局一致;云杉林每公顷水源涵养量随海拔升高先增大后降低、随坡度增大而降低,越接近阴坡,水源涵养能力越强。

(3)研究区各地类中以林地水源涵养能力最强(每公顷水源涵养量为 544.78 m^3/hm^2),随着云杉林覆盖率的不断增加,水源涵养功能不断增强,平均水源涵养深度、水源涵养总量及单位面积涵养量均呈增加趋势。

(4)随着森林面积增加,研究区水源涵养总量增加。云杉林面积每增加 1%,研究区与云杉林区水源涵养总量分别增加 0.437×10^6 m^3、0.522×10^6 m^3。因此,对研究区进行有计划的抚育造林,逐步扩大森林面积,可有效增加森林水源涵养生态服务功能。

参考文献(References):

[1] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 秦永胜. 森林对水文过程影响研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(1): 113-116.

[2] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624.

[3] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. 地理科学进展, 2012, 31(3): 330-336.

[4] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.

[5] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.

[6] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析. 地理学报, 2010, 65(1): 113-121.

[7] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. 生态学报, 2013, 33(3): 711-717.

[8] 马良, 金陶陶, 文一惠, 吴秀芹, 刘桂环. InVEST 模型研究进展. 生态经济, 2015, 31(10): 126-131, 179-179.

[9] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.

[10] Fisher B, Turner R K, Burgess N D, Swetnam R D, Green J, Green R E, Kajembe G, Kulindwa K, Lewis S L, Marchant R, Marshall A R, Madoffe S, Munishi P K T, Morse-Jones S, Mwakalila S, Paavola J, Naidoo R, Ricketts T, Rouget M, Willcock S, White S, Balmford A. Measuring, modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania. Progress in Physical Geography, 2011, 35(5): 595-611.

[11] Shaw M R, Pendleton L, Cameron D R, Morris B, Bachelet D, Klausmeyer K, Mackenzie J, Conklin D R, Bratman G N, Lenihan J, Haunreiter E, Daly C, Roehrdanz P R. The impact of climate change on California's ecosystem services. Climatic Change, 2011, 109(Supplement 1): 465-484.

[12] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(19): 7565-7570.

[13] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 张振明, 吕锡芝, 范敏锐. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13, 19-19.

[14] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.

[15] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.

[16] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.

[17] 王纪伟, 刘康, 瓮耐义. 基于 In-VEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究. 水土保持通报, 2014, 34(5): 213-217.

[18] 李明阳, 吴军, 时宇, 余超. 武夷山国家级自然保护区森林土壤涵水量估测及空间分析. 西南林业大学学报, 2014, 34(1): 1-7.

[19] 姚海燕, 张民. 乌鲁木齐河流域水管理信息系统. 水文, 2006, 26(2): 78-80, 96-96.

[20] 张东启, 周尚哲. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川对降水影响的定量分析. 冰川冻土, 2000, 22(3): 243-249.

[21] 张寅生, 康尔泗, 刘朝海. 天山乌鲁木齐河流域山区气候特征分析. 冰川冻土, 1994, 16(4): 333-341.

[22] 王红娟. 基于 GIS 和 RS 的分布式融雪径流模型在干旱区的应用研究——以乌鲁木齐河为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2004: 42-43.

[23] 新疆维吾尔自治区农业厅. 新疆土种志. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993: 6-28.

[24] 新疆维吾尔自治区农业厅, 土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996: 75-116.

[25] Feinstein A R, Cicchetti D V. High agreement but low Kappa: I. the problems of two paradoxes. Journal of Clinical Epidemiology, 1990, 43(6):

543-549.

[26] 张毓涛, 李吉玫, 常顺利, 李翔, 芦建江. 天山中部天山云杉种群空间分布格局及其与地形因子的关系. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2799-2806.

[27] 陆平, 严赓雪. 新疆森林. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1989: 46-507.

[28] 刘贵峰, 臧润国, 郭仲军, 巴哈尔古丽·阿尤甫, 张新平, 成克武, 白志强. 不同经度天山云杉群落物种丰富度随海拔梯度变化. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1407-1413.

[29] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 杨存建. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算. 生态环境学报, 2013, 22(3): 451-457.

[30] 张海波, 张明阳, 王克林, 秦建新, 符静. 南方丘陵山地带水源涵养功能变化特征. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 345-348.

[31] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108-113.

[32] 胡振华, 王治国. 晋西黄土残塬区坡面的日蒸散模型. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 95-98.

[33] 李海军, 张毓涛, 张新平, 韩占涛, 李吉玫. 天山中部不同林龄天然云杉林地表土壤入渗性能研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 197-203.

[34] 孙清琳, 李延森, 郭继凯, 吴秀芹. 云和县森林生态系统水源涵养功能评估. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(5): 888-896.

